

I はじめに

講演者は利根川上流部の支川赤谷川赤谷湖に面する小谷に昭和45年“相俣試験地”と称する洪水流出試験地を設け、ここで山地河川の洪水流出機構の多面的な研究を開始した。昨第16回水理講演会では昭和45・46両年の研究成果を“山腹における降雨の滲透と流下について”と題して中間報告した。相俣試験地は昭和47年7月中旬の豪雨でその中心施設である流量観測施設が完全に破壊されたため、その年一杯をもって閉鎖された。本報告はその後の研究成果を含めた相俣試験地における山地河川の洪水流出機構の研究成果の最終報告とも云うべきものである。

II 前回報告における結論

前回報告の結論は“一般山地河川においては流域の大部分を森林部すなわち森林土壌部が占め、森林土壌部では降雨はすべて地中に滲透してしまい表面流は発生せず中間流のみ発生する。表面流が発生するのは流域の極く限られた一部であって、洪水流出の主体は従来考えられて来た様な表面流出ではなく中間流出である。”と云うものである。

III 相俣試験地における観測・現地実験等の概要

1. 前回報告以後に行われた観測・現地実験等の項目 前回報告以後新たに実施をされた研究項目は①降雨の土壌への滲透時間並びに中間流の流下速度の実測②表面流発生域の測定③溪流河道における洪水流の流下速度の実測④山腹における散水実験の追加の四つであり、以下その概要を述べる。

2. 降雨の土壌への滲透時間並びに中間流の流下速度の実測 降雨の土壌への滲透時間の実測とは地表面に落下した有効雨滴が土壌に滲透し中間流に転じて斜面下を流下するまでにどの位の時間がかかるかを測定しようとするもので、山腹における散水実験施設を利用し次の二つの方法で行った。第一は散水を開始し散水区画よりの流出が定常状態に達した後、区画の下端にトレーサとしてウラニンの最濃水溶液約50ccを散布して流出水を30秒間隔で連続採水し、トレーサが流出水に認められるまでの時間を測定した。第二は散水装置から降らせる雨を一気にウラニンの濃水溶液の雨に切り替えてトレーサが流出水に認められるまでの時間を測定した。

中間流の流下速度の実測は上記測定に加えて散水区画の中央部にトレーサを散布し流出水にトレーサが認められるまでの時間を測定し、同様下端にトレーサを散布した時との時間差より求めた。

また全実験完了後、雨を降らせながら散水区画を掘って、降雨の滲透の状況、断面から中間流が流出して来る状況を観察した。

3. 表面流発生域の測定 相俣試験地の洪水流出測定区は集水面積約3.7ha、標高約750~900m、山腹の勾配は40~60度である。この洪水流出測定区は三つの地帯より構成されている。すなわち基岩が露出した河道並びにこれに連なる露岩地帯、V字谷の河岸の基岩の上に山腹から崩落して来た土砂あるいは落葉等が交互に堆積してスポンジ状の比較的薄い運積性土壌を形成している地帯、山腹の厚さ約1mの残積性土壌地帯である。基岩が露出した河道並びにこれに連なる露岩地帯は表面

流発生域であって、これが洪水流出測定区においてどれ程の割合を占めているかは解析を進める上で重要な事であり、非常な危険を冒して実測した。勾配が急で通常の測量は不可能なため河道を斜距離10～30m区間に分割し各区間の平均傾斜、平均基岩露出幅を概測することにより行った。

4. 溪流河道における洪水流の流下速度の実測 溪流河道における洪水流の流下速度の測定を実際の洪水で試みる事は事実上不可能であるので、河道に堰を造りこれに貯水して、これから一定量を放流することにより流下速度を実測することとした。相俣試験地の溪流河道の勾配は非常に急で貯水池を設ける適地が少なくまた標高の高い所では工事費が莫大になるので、傾斜はゆるいが比較的工事の容易な下流部に有効貯水量約30m³のコンクリート堰を築造した。洪水流発生のため堰の中央部分には切り欠きを設け三方水密スルースゲートを設置した。また堰から直下流に三つの流速測定区間を設けた。上流から第一区間は水平距離約21m傾斜約20度の基岩が完全に露出ししかも非常に平滑な河道である。第二区間は水平距離約19m傾斜約15度と比較的勾配がゆるく基岩の上に厚さ1m内外の砂礫が堆積した河道である。第三区間は水平距離約14m傾斜約25度と測定区間中最も勾配の急な所で、厚い砂礫堆積層に河道が切り込んだ様な状況である。第一・二区間は常時流水があるが、ここは伏流してしまっている。また丁度第二区間と第三区間の境界点に沢が一つ合流して来ており、ここで集水面積が倍増して約10haから20haとなっている。第二・三区間の河身部の河床礫の大きさは最大1m前後で、10～30cmクラスのものでその大部分を占めている。洪水流の流下速度の測定には種々の方法が考えられるが、この様な急勾配の流路の場合洪水流は通常の水 flow でなくあたかも水と空気が混合して出来た泡の塊の様な状態で流下するので、通常概念ではその測定が難しくまた平均流速を求めると云った事はまず不可能である。そこで一定量放流下で流況がほぼ定常状態になった時の最大流速を浮子ならびに螢光剤を用いて測定する事とした。浮子には赤色に塗ったビンボン球に注水して吃水を調節したものを用いた。螢光剤はウラニウムを用い、その濃水溶液を浮子投下時に同時に投入してその拡散状況を観察した。流下する一番速い浮子は螢光剤の拡散状況から見て洪水流の最大流速をほぼ表現していると見てまちがいない様である。

IV 山腹における散水実験結果

1. 実験計画 山腹における散水実験は昭和46年9月より47年8月までの間計10回行った。内4回は一樣降雨強度8.6～121.5mm/hrの間4段階で24時間連続して行った。この内第3回と4回実験の間は冬季をはさんで約8ヶ月間の期間をおき土壌の水湿状態の差が流出におよぼす影響を見ようとした。残り6回は相俣試験地で起り得る最大連続雨量を300mm程度と見なして降雨量を一定とし、降雨強度を変化させたりあるいは時間分布を変えて降らせその流出への影響を調べた。

2. 解析結果 以上10回の実験における特記事項を列挙すれば次の通りである。①総雨量で最大約3000mm、最大降雨強度で約140mm/hr、最大連続時間で24時間の散水を行ったがいずれも表面流(土壌A層の表面を流れる流れ)は発生しなかった。またA・B層中の流れも発生しなかった。②降雨はすべて土壌中に滲透してしまい、その一部がC・D層を流れる中間流となって散水区画より流出した。③土壌に滲透した降雨はさらに基岩中に相当大量に滲透して行っており、降らせた雨と中間流となって区画外に流出した量の割合を流出率と定義するならば、流出率は最大が22.6%最低が0%であった。④散水実験は結果として土壌の最初の湿りの状態がほぼ同じ状態から行われた

が、中間流が発生するまでの累加雨量は降雨強度の大小にはあまり関係なくほぼ一定でその値は60 mm前後であった。⑤中間流は流出開始後比較的短い時間で定常状態に達し、その後降雨強度を変化させない限りほぼ一定強度で流出し、降雨が終了すると一般に数分間降雨中と同じ流出強度を継続してから急速に衰る。⑥降雨強度を変えてからこれに応じて流出強度が変わるまでの時間は数分から十数分である。⑦基岩への降雨の滲透強度は基岩の云うなれば湿り状態で著しい差がある様である。また降雨強度が大となると滲透強度もそれに応じて大きくなる様である。⑧散水開始後の土壌の湿りの変化を見るとまず表面付近がほぼ飽水してこれが徐々に深部におよびC・D層がほぼ飽水した時点で中間流が発生している様である。

次に135 mm/hrの強度の降雨を降らせながら土壌を垂直に切断し、降雨の滲透並びに中間流の流出状況を観察した結果を列記すると次の通りである。①A層の土壌小孔隙はほぼ飽水しており、土壌塊の表面を水が下方に向かって流れていた。しかし大・中孔隙は全々飽水していない。②B層の中・小孔隙はほぼ飽水していた。しかし大孔隙は全々飽水していない。水は土壌塊表面を下方に向かって流れていた。③C・D層の中・小孔隙は飽水しており、大孔隙からは水が吹く様に流出していた。また散水装置はダイヤフラムポンプを用いているので雨は周期的に降る特性を持っているが、大孔隙から吹き出る水も同様の周期で脈動しているかに見えた。④C・D層の断面から水が流出する状況は土壌全体からの様な滲出でなく、点在する大孔隙からの流出であった。なおC・D層から各1ヶの不攪乱資料を採取し通常の粒度試験を行った所、三角座標による分類ではロームと判定された。10%粒径はC層土が0.003 mm D層土が0.004 mmであり、推定される透水系数は $k = 10^{-5}$ cm/sec程度である。また吸引法で大孔隙量($P_F = 1.3$ 以下)を測定した所10%前後の値が得られた。⑤前記不攪乱資料をチューブより押し出し切断した所、シールのため流し込んだパラフィンが大孔隙の中に流れ込み固結して直径数~数十mmの太さの枝状をなししかも一端から他端まで連なっていた。この様な連続した大孔隙の中に滲透水が集まり中間流となって流れていると考えられる。⑥C・D層は非常に固結しており、表面を水が流れても全々くずれなかった。

3. 以上のまとめ 以上の結果を総合すると、森林土壌は非常に多孔質で森林土壌部では降雨はすべて滲透してしまい表面流は発生しない。土壌に滲透した降雨は地表面と並行に飽水面を形づくり徐々に降下して基岩に達し、またさらに基岩の割れ目から深部にまで滲透して行く。降雨強度と基岩への滲透強度との差が中間流に転じて地表と並行に移動し河道に流出するものと考えられる。降雨強度が変わってから流出強度が変化するまで数分を要することから見て、有効降雨が土壌に滲透して中間流に転ずるまでに相当時間を要する様であり、この問題については更につぎで述べたい。

V 降雨の土壌への滲透時間並びに中間流の流下速度の実測結果

散水実験施設で降雨強度128 mm/hrの雨を降らせながら散水区画の中央と下端にトレーサを散布して、流出水にトレーサが現われる時間を測定した所、中央からの時間は9分下端からの時間は8分であった。下端からの流出時間はほぼ降雨が土壌に滲透して中間流に転ずるに要する時間と考えられるから、斜距離で約2 mを中間流が流れるのに約1分を要した事になる。また散水装置よりトレーサの雨を強雨強度135 mm/hrで降らせトレーサが流出水中に認められるまでの時間は10分であった。ただし降雨を中断して散水装置から水を全部追い出しトレーサに切り替え、また降雨を再開す

るまでに約2分を要しているの、10分と云う値に対してはその影響を考慮しなければならないであろう。散水実験で中間流が流出開始し定常状態に達するまでの時間、散水終了より中間流出が低下し始めるまでの時間、降雨強度を変えてから中間流出強度が変化するまでの時間と以上の値を引き較べて見ると相当の一致点を見い出せる部分が多い。以上の結果を総合すると、有効雨滴が地表面に落下して厚さ約1m程度の土壌層を滲透して中間流に転ずるまでにはどうも数分程度を要することはまづまちがいない様である。また中間流となってO・D層中を斜面と並行に移動する速度は意外と速く、その値はすなわちm/minのオーダーの様である。

Ⅵ 表面流発生域の測定結果

洪水流出測定区の基岩が露出した河道の最長距離は斜め約280m水平約210mであり、河道の平均傾斜は約4.1度であった。また基岩の露出した区域の総面積は約2,100㎡で、集水面積に対する割合は6%弱であった。すなわち相俣試験地の洪水流出測定区では集水面積の6%弱が表面流発生域であって、残り94%強の部分は森林土壌部で占められ、前にも述べた通りここでは表面流は発生せず中間流のみが発生すると考えることができる。いま観測した88出水について直接流出率が6%以上の出水とそれ以下の出水を雨量階級別に分類して見ると直接流出率が6%以下の出水は総雨量が20mm以下である。これに対して直接流出率が6%以上の出水は総雨量が20mm以上のものが多く、また20mm以下の出水について見ると初期流量が非常に大きいかあるいは前期降雨が相当あった状態で発生している。また6%以下の出水の直接流出率の平均値は3.5%となる。これに対応する出水の総雨量の平均値が9.7mmであって、今非常に単純な計算をして見ると、洪水流出測定区の河道並びにこれに連なる露岩地帯は平均水深にして約4mmの保水力がある事になる。すなわち常時水流がありその上に降った雨がすぐに流出する部分をのぞいた他の露岩地帯に降った雨は累加雨量が数mmになるまでは流出を開始しないと考えることも出来よう。またさらに直接流出率が6%以上の出水で総雨量が20mm以上の出水の直接流出率の平均値は15.0%であることを見ると、河道並びにこれに連なる露岩地帯に降った雨が100%流出したとしても、総雨量が20mm以上の降雨による出水では中間流出がその主体を占めていると云うことは明らかに云える。

Ⅶ 溪流河道における洪水流の流下速度の実測結果

洪水流の流下速度の実測は比流量が約40・30・20・10の各段階で行った。但し第三区間は約半分の値である。その結果は表の通りである。これらの結果から特記事項を列举すれば次の通りである。①洪水流の最大流下速度は河床勾配がある程度以上急になると流量が変化してもほぼ一定である。②洪水流の流下速度は非常に河床の粗度の影響を受けている様である。③また流量の大小にも大きく影響を受けている様である。④洪水時の観察結果から見ても相俣試験地の溪流河道における洪水流の最大流下速度は基岩が露出ししかも極めて平滑な部分を除いてはせいぜい最大毎秒1m前後と云う値であろう。またここで実測したのは最大流速であるから平均流速となるとさらに小さな値を示すであろう。

すなわち山地河川の勾配の急な溪流河道の洪水流の流下速度としては一般通念と少しかけはなれた数値が得られたが、この原

表－浮子の最大流下速度

比流量 区間	40	30	20	10
第一区間	2.9	2.7	2.7	2.7
第二区間	1.5	1.1	0.7	0.3
第三区間	1.2	1.3	1.3	1.3

(単位：m/sec)

因としては①山地河川の溪流河道の河床勾配は極めて粗いこと、②河幅が比較的広く洪水流の水深が浅いこと（溪流河道の集水面積が小さいため比流量は大きくても絶対流量が非常に小さいこと）等によると考えられる。

Ⅷ 以上の解析結果の総まとめ

まず相俣試験地では山腹の残積性森林土壌部に落下した雨滴は総て地中に滲透し、土壌孔隙を地表面から深部に向けて徐々にほぼ飽水させ、飽水面を形成しながら基岩にまで達する。降雨はさらに基岩の深部にまで滲透して行く。そして降雨強度と基岩への滲透強度との差が中間流に転じて σ 並びに D 層を地表面と並行に河道に向けて流下して行っていると考えられる。したがって基岩の風化が深部にまでおよんでいる山腹の上部並びに中部では降雨は土壌層からさらに基岩中に全部滲透してしまい中間流はよほどの豪雨でもない限りまず発生しないであろう。これに対し山腹下部は厚さ 1 m の土壌層が堅硬な基岩の上に面然と境界をつくって乗っており、ここでは累加雨量が 200 mm のオーダをこすと相当量の中間流が発生するであろう。すなわち中間流が発生するには土壌全層をほぼ飽水させ得る量の累加雨量がなければならず、しかも飽水後も降雨強度が基岩への降雨の滲透強度を上回っていなければならない。以上の条件を満たした上で有効雨滴が土壌面に落下し中間流に転ずるまでに要する時間は土壌厚さが 1 m 程度の場合数分と云ったオーダであろう。また中間流が土壌中を流れる径路は σ 並びに D 層であって、従来一般に云われる様な A 層ではない。しかも σ 並びに D 層中の連続した大孔隙の中を相当の速度すなわち m/min のオーダで流れて河道に流出する様である。

河岸の運積性土壌地帯に落下した雨滴は土壌厚さが薄いため比較的少ない累加雨量で土壌をほぼ飽水させ、比較的早期に中間流が発生し、しかも観察によれば土壌と基岩の境界面を比較的早い速度で流れて河道に流出する。したがってこの地帯で発生する中間流は降雨波形に比較的良く対応する。基岩が露出した河道並びにこれに連なる露岩部に落下した雨滴は直接流水の上に落下したものをのぞいては累加雨量がほぼ数 mm に達するまでは流下しないであろう。

相俣試験地では総雨量が 20 mm 以上の出水になると直接流出の主体は完全に中間流出に移り、総雨量が大きくなればなるほどその主体性は増長するであろう。

次に相俣試験地では溪流河道に流出した有効降雨がそこを流下して幹川河道（ 5 万分の一の地形図に表現されている程度の）にまで到達するまでに要する時間は、溪流河道の粗度が大でありまた絶対流量が少ないこと等により非常に遅く、その平均流下速度はせいぜい毎秒数十 cm のオーダであると推定される。したがって相俣試験地の任意の地点に落下した有効雨滴が幹川河道にまで到達するに要する平均的な時間は相当かかり二十～三十分と云ったオーダの時間はどうしても必要とするであろうと考えられる。

Ⅸ 相俣試験地の洪水流出機構と他流域のそれとの関係について

相俣試験地における多面的な研究で相俣試験地の洪水流出機構はほぼ究明できたと講演者は考えているが、ここで得られた結果と他の一般山地流域との関連性につき最後に少しく論じて見たいと思う。いま相俣試験地、相俣試験地を含む利根川水系赤谷川相俣ダム流域、天龍川水系三峯川美和小試験地、北上川水系胆沢川石淵ダム流域、旧北上川水系江合川鳴子ダム流域の五流域について総雨量と総損失雨量の関係を両対数方眼紙上にプロットとするといずれも高度の直線関係を示し、しかもその関係は

良く類似している。総雨量と総有効雨量の関係もまた直線関係を示す。しかし総雨量と総損失雨量の関係では点のバラツキ幅が総雨量の多寡に関係なくほぼ一様であるが、総雨量と総有効雨量の関係では総雨量が少ない時は点のバラツキが大きく総雨量が大きくなるに従いバラツキが小さくなって、ある線に収斂して行くが如き観がする。講演者はある流域における総雨量と総有効雨量並びに総損失雨量の関係はその流域の洪水流出機構を間接的に表現しているものと考えているが、この関係が五流域共非常に良く似ていると云う事は相俣試験地が決して特異な流域ではなく、したがって相俣試験地での研究から得られた山地河川の洪水流出機構は少くとも同様の関係の得られた相俣ダム流域・美和小試験地・石淵ダム流域・鳴子ダム流域に対しては適用できる事を示しているものと解している。

X 結論

山地河川流域では表面流は極く限られた地帯すなわち河道ならびにこれに連なる露岩地帯・崩壊斜面・道路・宅地等でしか発生せず、流域の大部分を占める森林土壌部では降雨は総て滲透してしまい中間流のみが発生する。したがって総降雨量が大きくなるにしたがって中間流出が直接流出に占める割合が大きくなる。山地河川流域では総雨量と総損失雨量の間に高度の相関関係が存在するのは中間流出が直接流出の主体を占めているためであって、ある流域における総雨量と総損失雨量の関係はその流域の洪水流出機構を間接的に表現している。

山地河川流域の任意の地点に落下した有効雨滴が溪流河道に流出してそこを流下し、幹川河道に到達するまでに要する時間は相当長い。すなわち溪流河道を含む山地の山腹は有効降雨に対して非常に大きな遅滞作用をなしている。

XI おわりに

相俣試験地における観測・現地実験等の実施にあたり多くの御援助・協力をいただいた利根川上流工事々務所並びに梶野康行元所長・清水佐元調査課長、利根川ダム統合管理事務所並びに山本高義元所長・寺田斐夫所長・松原峯生元調査課長・藤崎利雄調査課長・武捨春雄元調査係・相俣ダム管理所職員御一同様、渡良瀬川工事々務所並びに田口英夫所長、長岡工事々務所、高崎工事々務所、月夜野営林署、田部井建設田部井一郎社長、佐伯建設小室正人大阪支店長、大竹木材商事大竹隆一郎氏、並びに降雨の土壌への滲透時間並びに中間流の流下速度の実測について御協力いただいた新潟大学工学部坂口雅一教授の各位に対し深く感謝の意を表するものであります。

XII 参考文献

- 1) 岡本芳美他 美和小試験地における洪水流出についての一考察 土木技術資料 11-6
- 2) 岡本芳美 山地水源部における洪水流出機構に関する一考察 土木学会第24回年講演集第2部
- 3) 岡本芳美 山地水源部における流出の観測 土木学会第25回年講演集第2部
- 4) 岡本芳美 微小流域とこれを含む大流域並びに同水系内の近接する大流域における洪水流出の比較 土木学会第26回年講演集第2部
- 5) 岡本芳美 山腹における降雨の滲透と流下について 土木学会第16回水理講演会講演概要集
- 6) 岡本芳美 相俣試験地並びに相俣ダム流域における総雨量と総損失雨量の関係について 文部省科研費特定研究最終報告書「関東甲信越地区の河川災害に関する総合的研究」昭和47年3月
- 7) 岡本芳美 山地河川の洪水流出機構の研究 土木学会第27回年講演集第2部